

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 662.767:536.7:681.121

### МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА СТИСЛИВОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ СПРОЩЕНОГО НАБОРУ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО СКЛАДУ

*Ф.Д. Матіко, Г.Ф. Матіко, С.Ю. Шоловій*

*Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013,  
тел. (0322)72–77–61*

*Викладено результати порівняльного аналізу методів розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу на основі спрощеного набору параметрів складу за їх областю застосування, структурою алгоритму та методичною похибкою. Виконано аналіз можливості впровадження методів нових національних стандартів у системах обліку природного газу.*

*Ключові слова: коефіцієнт стисливості, природний газ, витрата газу, стандарт, система обліку газу.*

*Изложены результаты сравнительного анализа методов расчета коэффициента сжимаемости природного газа на основе упрощенного набора параметров состава за их областью применения, структурой алгоритма и методической погрешностью. Выполнен анализ возможности внедрения методов новых национальных стандартов в системах учета природного газа.*

*Ключевые слова: коэффициент сжимаемости, природный газ, расход газа, стандарт, система учета газа.*

*There are described the results of comparative analysis of methods of calculating the coefficient of compressibility of natural gas based on a simplified set of parameters for their scope, structure, algorithm, and methodological errors. The analysis of possible methods of implementation of new national standards in keeping natural gas is executed.*

*Key words: compressibility factor, natural gas, fuel gas, a standard system of gas.*

Сучасні системи обліку природного газу побудовані на основі мікропроцесорних обчислювачів витрати і кількості. Це дає можливість реалізувати в реальному часі обчислення витрати і кількості із врахуванням зміни фізичних властивостей газу. В найбільш поширених конфігураціях систем обліку параметри фізичних властивостей газу обчислюються в реальному часі на основі вимірних значень тиску і температури та на основі визначених попередньо та введених в обчислювач значень параметрів складу.

Одним із параметрів фізичних властивостей, розрахунок якого виконується як обчислювачами витратомірів змінного перепаду тиску, так і коректорами лічильників газу є коефіцієнт стисливості газу. Коефіцієнт стисливості входить безпосередньо у рівняння розрахунку витрати за методом змінного перепаду тиску та у рівняння приведення об'єму газу, тому вплив похибки визначення

коефіцієнта стисливості на похибку вимірюваного значення витрати та об'єму газу є значним [1, 2].

Для розрахунку коефіцієнта стисливості запропоновано велику кількість методів, які побудовані на основі принципу відповідних станів, на основі віріального рівняння стану, спеціальних багатоконстантних рівнянь стану. На основі методів відомих світових центрів із дослідження фізичних властивостей розроблені стандарти: ГОСТ 30319.2-96 [3], ДСТУ ISO 12213-2,3:2009 [4, 5], ISO 20765-1:2005 [6]. Авторами розроблена спрощена методика розрахунку коефіцієнта стисливості, в широкому діапазоні зміни тиску, що покладена в основу документу ДССДД 4-2002 [7]. Вказані нормативні документи мають різні вимоги до формування вхідних даних для виконання розрахунку, різні алгоритми розрахунку, однак межі застосування багатьох із них є близькими. Тобто області застосування методів мають

спільні підобласті. Тому часто виникає завдання вибору методу розрахунку коефіцієнта стисливості для окремої задачі із переліку тих, застосування яких дозволене нормативними документами для умов цієї задачі.

Метою даної роботи є виконання порівняльного аналізу методів розрахунку коефіцієнта стисливості на основі спрощеного набору параметрів складу, введених у нормативні документи [3-6] за їх областю застосування, структурою алгоритму та методичною похибкою.

Починаючи з 2000 р., в Україні введений в дію та застосовується для розрахунку параметрів фізичних властивостей природного газу комплекс Міждержавних стандартів ГОСТ 30319.0,1,2,3-96. В склад цього комплексу входить стандарт ГОСТ 30319.2-96 [3], який безпосередньо стосується розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу і містить чотири методи розрахунку: модифікований метод NX19 мод., модифікований метод Європейської групи газових досліджень GERG-91 мод., метод Американської газової асоціації AGA8-92DC, метод Всеросійського науково-дослідного центру сировини, матеріалів і речовин ВНИЦ СМБ.

Методи NX19 мод. та GERG-91 мод. вимагають для виконання розрахунку мінімального набору вхідних даних. Склад природного газу для цих методів задають трьома параметрами: густиною за стандартних умов, вмістом азоту та вмістом вуглекислого газу. Аналогічний підхід до визначення набору вхідних даних застосований і в методиці ДССДД 4-2002 [7], склад природного газу задається за допомогою трьох названих вище параметрів. Для розрахунку коефіцієнта стисливості за методами AGA8-92DC та ВНИЦ СМБ необхідно мати дані про повний компонентний склад газу.

Стосовно структури алгоритму розрахунку методи NX19 мод. та GERG-91 мод. побудовані за лінійним безітераційним алгоритмом. Алгоритм розрахунку за методами AGA8-92DC та ВНИЦ СМБ є ітераційним із послідовним уточненням пари взаємозалежних параметрів – густини в робочих умовах та фактора стисливості.

Стандартом ГОСТ 30319.2-96 [3] для всіх чотирьох методів розрахунку коефіцієнта стисливості визначена однакова область застосування за діапазоном зміни тиску ( $0,1 \text{ МПа} \leq p \leq 12,0 \text{ МПа}$ ), температури ( $250 \text{ К} \leq T \leq 340 \text{ К}$ ), густини газу за стандартних умов ( $0,66 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_c \leq 1,05 \text{ кг/м}^3$ ), вмісту азоту

та вуглекислого газу ( $0 \leq x_a \leq 15 \text{ мол.}\%$ ;  $0 \leq x_y \leq 15 \text{ мол.}\%$ ).

Однак змінами №1 до комплексу ГОСТ 30319 уточнено область застосування окремих методів та введено обмеження їх області застосування за вищою теплотворною здатністю природного газу. Змінами №1 визначено, що метод NX19 мод. може бути застосований для природних газів із вищою теплотворною здатністю в межах  $32 \text{ МДж/м}^3 \leq H_{c,v} \leq 40 \text{ МДж/м}^3$ , інші три методи – для природних газів із теплотворною здатністю  $20 \text{ МДж/м}^3 \leq H_{c,v} \leq 48 \text{ МДж/м}^3$ . Однак навіть для природних газів, що відповідають за теплотворною здатністю та параметрами складу газу вказаній області застосування, відхилення розрахункових значень коефіцієнта стисливості, отриманих за методами ГОСТ 30319.2-96, може бути значним.

Для прикладу, на рис. 1 наведені результати порівняння значень коефіцієнта стисливості отриманих за методами GERG-91 мод. та NX19 мод. для таких двох варіантів складу природного газу із такими параметрами:

- а)  $\rho_c = 0,6807 \text{ кг/м}^3$ ,  $x_a = 0,8 \%$ ,  $x_y = 0,04 \%$ ;
- б)  $\rho_c = 0,7195 \text{ кг/м}^3$ ,  $x_a = 0,92 \%$ ,  $x_y = 0,93 \%$ .

Обидва варіанти складу відповідають сертифікатам якості природного газу лабораторій ДК «Укртрансгаз». На рис. 1 наведено ізотерми залежності відносного відхилення між методами GERG-91 мод. та NX19 мод. від тиску. Значення відносного відхилення обчислені за формулою

$$\delta = (K_{\text{GERG}} - K_{\text{NX}}) / K_{\text{NX}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

Для «легких» природних газів (рис. 1, а) в діапазоні зміни тиску до 6 МПа значення відносного відхилення розподілені як в півплощині додатних, так і в півплощині від'ємних значень  $\delta$ . Середнє значення відносного відхилення  $\delta$ , яке характеризує систематичну складову відхилення між методами, є близьким до нуля.

Для відносно «важких» природних газів, у яких густина за стандартних умов перевищує  $0,7 \text{ кг/м}^3$ , відносне відхилення  $\delta$  має від'ємний знак у переважній частині області зміни тиску та температури (рис.1, б). Отже для таких природних газів наявне систематичне відхилення результатів розрахунку за методами GERG-91 мод. та NX19 мод. Від'ємний знак відхилення свідчить про те, що значення коефіцієнта стисливості, отримані за методом GERG-91 мод, є меншими від значень, отриманих за NX19 мод. Модуль відхилення зростає із збільшенням тиску та зниженням

значення температури.

Тобто вибір методу розрахунку коефіцієнта стисливості найбільш суттєво впливає на похибку вимірювання витрати в системах обліку, що працюють при високому тиску. Наприклад, для природного газу, склад якого відповідає варіанту б), за умови робочого тиску газу 4,0 МПа відносне відхилення між методами GERG-91 мод. та NX19 мод. становить від -0,05 % до -0,3 %. Таке відхилення значення коефіцієнта стисливості приводить до виникнення систематичного відхилення значення витрати, вимірюваного за методом змінного перепаду тиску, на величину від +0,025 % до +0,15 %. Це систематичне відхилення витрати може бути однією із причин виникнення небалансу облікованого об'єму газу за допомогою систем обліку, у яких застосовані різні методи розрахунку коефіцієнта стисливості.

Наказом Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики № 485 від 30.12.2009 [8] затверджено національні стандарти ДСТУ ISO 12213-1, 2, 3:2009, які є ідентичними до відповідних стандартів ISO 12213-1, 2, 3:2006. Стандарт ДСТУ ISO 12213-2:2009 [4] містить метод розрахунку фактора стисливості природного газу на основі рівняння стану AGA8-92DC та даних про повний компонентний склад газу. Стандарт ДСТУ ISO 12213-3:2009 [5] містить

метод розрахунку фактора стисливості на основі віріального рівняння стану SGERG-88 за спрощеним набором даних про склад газу.

Слід підкреслити, що в стандартах [4, 5] викладено методику розрахунку фактора стисливості і не розглядається розрахунок коефіцієнта стисливості, хоча саме коефіцієнт стисливості застосовується в розрахункових рівняннях, реалізованих в системах обліку.

У методах розрахунку стандартів [4] і [5] застосовано складний ітераційний алгоритм розрахунку. Для розв'язування рівняння стану AGA8-92DC [4] необхідно реалізувати ітераційний процес із послідовним уточненням густини в робочих умовах та фактора стисливості. Для розрахунку фактора стисливості за рівнянням SGERG-88 [5] необхідно реалізувати два ітераційні процеси: перший – для розрахунку проміжних параметрів в циклі із послідовним уточненням густини за стандартних умов та вищої теплоти згорання газу; другий – для розрахунку молярної густини газу за робочих умов в циклі із послідовним уточненням тиску газу. Отже, не зважаючи на те, що метод SGERG-88 призначений для розрахунку фактора стисливості за спрощеним набором даних про склад газу, алгоритм методу складний і вимагає для програмної реалізації обчислювальних потужностей не менших, ніж методи, що призначені для розрахунку за даними про повний компонентний склад газу.

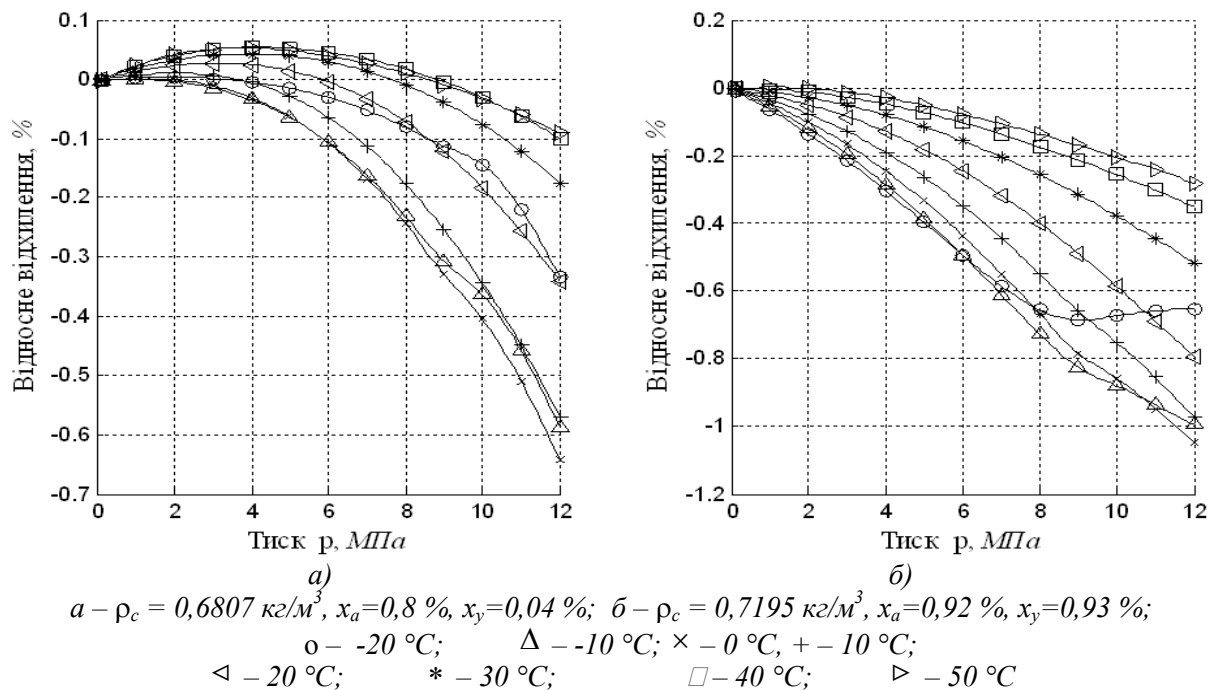


Рисунок 1 – Ізотерми залежності відносного відхилення між методами GERG-91 мод. та NX19 mod. від тиску для природних газів

Необхідно також звернути увагу на те, що стандартом [5] зменшена область застосування методу SGERG-88 порівняно із GERG-91 мод. [3] за діапазоном зміни температури. Для основної області застосування діапазон зміни температури становить від 263 К до 338 К. Метод SGERG-88 може бути застосований і в діапазоні зміни температури газу від 250 К до 263 К, однак невизначеність розрахунку фактора стисливості у цьому діапазоні зміни температури може досягати 0,5 % для тиску газу більше 5,0 МПа [5].

Для розрахунку фактора стисливості за методом SGERG-88 набір вхідних даних може бути сформований у декількох варіантах, основний із яких містить такі параметри: тиск та температуру газу, вищу теплоту згорання у об'ємному базисі, відносну (до повітря) густина за стандартних умов, вміст вуглекислого газу та вміст водню.

Отже набір вхідних даних для методу SGERG-88, застосованого у [5], суттєво відрізняється від набору даних для методів, які застосовані у всіх інших нормативних документах, що діють зараз в Україні. Для підготовки вказаного набору даних необхідно визначити, зокрема, і теплоту згорання природного газу.

Для визначення теплоти згорання природного газу в діючих нормативних документах, зокрема ГОСТ 30319.1-96 [2], пропонуються розрахункові методики на основі даних про повний компонентний склад газу та

на основі спрощених даних про його склад. Однак недоліком рівнянь, які пропонуються для розрахунку теплоти згорання за спрощеними даними про склад газу, є те, що вони розроблені для стандартних умов  $T_c = 293,15$  К та  $P_c = 101325$  Па. Метод SGERG-88 розроблений для об'ємного базису  $T_c = 273,15$  К та  $P_c = 101325$  Па, тому спрощені рівняння [2] не можуть бути застосовані для підготовки його вхідних даних.

Додатково до методики, запропонованої в [2], наказом [8] затверджений стандарт ДСТУ ISO 6976:2009 [9] для розрахунку теплоти згорання за даними про повний компонентний склад газу. В стандарті [9] викладена методика розрахунку теплоти згорання природного газу для різних умов приведення, в тому числі для умов  $T_c = 273,15$  К та  $P_c = 101325$  Па, які прийняті за об'ємний базис для методу SGERG-88.

Отже для розрахунку теплоти згорання у об'ємному базисі методу SGERG-88 [5] необхідно застосувати одну із методик запропонованих в [2] або [9], які вимагають даних про повний компонентний склад газу. Таким чином, втрачається перевага методу з точки зору простоти набору його вхідних даних.

Авторами виконане порівняння результатів розрахунку фактора стисливості за методом SGERG-88 [5] та методом GERG-91 мод. [3] для наведених вище варіантів а) та б) складу природного газу. Результати порівняння представлені на рис. 2.

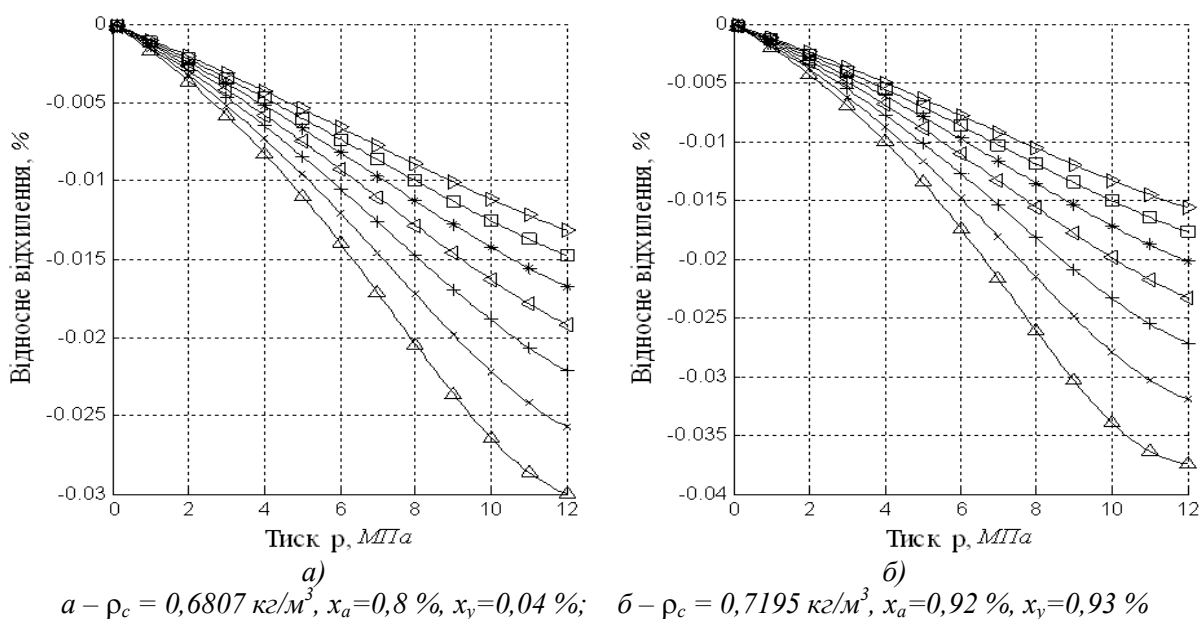


Рисунок 2 – Ізотерми залежності відносного відхилення між методами SGERG-88 [5] та методом GERG-91 мод. [3] від тиску для природних газів складу

Набори вхідних даних для обох методів сформовані на основі даних про повний компонентний склад газів а) та б). Розрахунок теплоти згорання виконаний за ДСТУ ISO 6976:2009 [9]. Порівняння виконане для значень температури від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для позначення ізотерм застосовані ті ж символи, що й на рис. 1.

Із рис. 2 видно, що відхилення між методами SGERG-88 [5] та GERG-91 мод. [3] є незначними з точки зору їх застосування у системах обліку для усього дослідженого діапазону зміни тиску та температури. В діапазоні значень тиску до 4,0 МПа відносне відхилення між методами не перевищує за модулем 0,01%. Враховуючи результати порівняння, можна зробити висновок, що методична похибка розрахунку за цими двома методами є близькою.

### ВИСНОВКИ

Для розрахунку коефіцієнта стисливості на основі спрощеного набору даних про склад газу в задачах обліку можуть бути застосовані методи ГОСТ 30319.2-96 [3], ДССДД 4-2002 [7]. Стандарт [5] вводить в дію ще один метод розрахунку фактора стисливості на основі на основі спрощеного набору даних про склад газу – метод SGERG-88.

Відхилення значень коефіцієнта стисливості, обчислених за методами ГОСТ 30319.2-96 GERG-91 мод. та NX19 мод., можуть бути значними, особливо для «важких» природних газів ( $\rho > 0,7\text{ кг/м}^3$ ). Для таких природних газів наявне систематичне відхилення результатів розрахунку за цими методами. Модуль відхилення зростає із збільшенням тиску та зниженням температури. Систематичне відхилення значення коефіцієнта стисливості приводить до виникнення систематичного відхилення значення витрати, вимірюваного за методом змінного перепаду тиску, що може бути однією із причин виникнення небалансу облікованого об'єму газу за допомогою систем обліку, у яких застосовані різні методи розрахунку коефіцієнта стисливості.

Стандарт ДСТУ ISO 12213-3:2009 має декілька суттєвих недоліків з точки зору його застосування у системах обліку, а саме:

- у стандарті передбачено розрахунок фактора стисливості, а не коефіцієнта стисливості, тому необхідне доопрацювання стандарту з метою включення в ньому методики розрахунку коефіцієнта стисливості;

- для розрахунку фактора стисливості за рівнянням SGERG-88 необхідно реалізувати складний ітераційний алгоритм;

- набір вхідних даних для методу SGERG-88 суттєво відрізняється від набору даних для методів інших нормативних документів і містить вищу теплоту згорання газу. Для визначення теплоти згорання газу необхідно виконувати її вимірювання, або обчислювати на основі даних про повний компонентний склад газу.

1. Матіко Ф.Д. Влияние неопределенностей физических свойств газоподобных энергоносителей на точность их обліку / Ф.Д. Матіко // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2009. – № 70. – С. 76–81. 2. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1–96. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 15 с. 3. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости : ГОСТ 30319.2–96. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 53 с. 4. Природный газ. Обчислення фактора стисливості. Частина 2. Обчислення на основі молярного складу (ISO 12213–2:2006, IDT) : ДСТУ ISO 12213–2:2009. – [Чинний від 01.01.2011]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 32 с. – (Національний стандарт України). 5. Природный газ. Обчислення фактора стисливості. Частина 3. Обчислення на основі фізичних властивостей (ISO 12213–3:2006, IDT) : ДСТУ ISO 12213–3:2009. – [Чинний від 01.01.2011]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 38 с. 6. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications. ISO 20765–1:2005. 7. Газ природный. Методика розрахунку коефіцієнта стисливості у діапазоні тиску 12 ... 25 МПа: ДССДД 4–2002. – [Введ. 01.07.2002]. – Київ: Держстандарт України, 2002. – 5 с. 8. Про затвердження та скасування чинності національних стандартів України: Наказ Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики № 485 від 30.12.2009. 9. Природный газ. Обчислення теплоти згорання, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1999, IDT) : ДСТУ ISO 6976:2009. – [Чинний від 01.01.2011]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 46 с. – (Національний стандарт України).

Поступила в редакцію 03.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Пістун Є.П.